

На правах рукописи

Терегулова Эльза Рустэмовна

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПЛИТ, ЛЕЖАЩИХ НА
ДЕФОРМИРУЕМОМ ОСНОВАНИИ

01. 02. 04. – Механика деформируемого твёрдого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Диссертации на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук

КАЗАНЬ - 2009

Работа выполнена на кафедре сопротивления материалов и основ теории упругости и пластичности Казанского государственного архитектурно-строительного университета

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,

профессор Терегулов Ильтузар Гизатович

кандидат физико-математических наук,

доцент Низамеев Васил Габдулхаевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,

профессор Паймушин Виталий Николаевич

доктор физико-математических наук,

профессор Серазутдинов Мурат Нуриевич

Ведущая организация

Институт механики и машиностроения,
Казанский научный центр РАН

Защита состоится 28 января 2010 г. в 14 часов 30 минут в ауд. мех.2
на заседании диссертационного совета Д 212.081.11 Казанского государственного
университета по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И.
Лобачевского Казанского государственного университета

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим высылать
по адресу: 420043, г. Казань, ул. Зелёная, 1. Копии отзывов просим присылать
соискателю учёной степени кандидата технических наук

E-mail: teregul@yandex.ru

Автореферат разослан 21 декабря 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук, доцент

Саченков А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В строительной практике широко применяются плиты, расположенные на деформируемом основании. К таким плитам относятся, например, сплошные фундаментные плиты, плиты дорожных и аэродромных конструкций, днища шлюзов и доков, различные коробчатые конструкции, контактирующие с грунтом. Эти конструкции порой характеризуются большой материалоемкостью и должны обеспечивать нормальную эксплуатацию всего сооружения. Существующие методы расчета не всегда совершенны и не дают ответов на множество вопросов, возникающих при расчёте строительных конструкций. Большая часть этих методов носит слишком сложный для практических вычислений характер; не могут считаться совершенными и те гипотезы, которые принимаются для работы естественного грунта. Поэтому уточнение и совершенствование методов расчета таких конструкций, как «плита – деформируемое основание» является одной из актуальных проблем механики деформируемого твёрдого тела.

Большой интерес представляют задачи определения несущей способности железобетонных прямоугольных пластин, лежащих на деформируемом основании.

Цели работы. Разработка методики расчета предельной нагрузки, при которой реализуется процесс пластического деформирования пластин, лежащих на упругом основании. Выявление специфики пластического деформирования плит, лежащих на деформируемом основании. Исследование на основе вариантных расчетов закономерностей влияния механических и геометрических параметров на прочность пластин.

Научная новизна. Разработана методика расчета пластин, лежащих на деформируемом основании, в том числе расчет железобетонных прямоугольных плит. Выявлена специфика деформирования пластин, вызванная образованием пластических шарниров. Изучено влияние механических и геометрических параметров на поведение и прочность конструкции «плита – деформируемое основание»; выявлены закономерности образования пластических шарниров в зависимости от схемы приложения нагрузки.

Практическая ценность. Разработана компьютерная программа, позволяющая определять предельную нагрузку для прямоугольных железобетонных плит, лежащих на деформируемом основании при действии сосредоточенной силы, приложенной в произвольной точке. Практическое применение найдут приведенные схемы и формулы для определения предельной нагрузки для плит, которые можно использовать в прикладных расчетах.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректной физической и математической постановкой задачи, применением классических математических методов и вариационных принципов механики сплошной среды. В частности достоверность подтверждается совпадением значений предельной нагрузки полученных в работе для шарнирно-опертых плит с решениями А.Р. Ржаницина и хорошим согласованием с экспериментальными исследованиями // Жесткие покрытия аэродромов и автомобильных дорог. Г.И. Глушков, В.Ф. Бабков, В.Е. Тригони и др.; Под ред. Г.И. Глушкова: учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Транспорт, 1994.-349с. - отклонение значений предельных

нагрузок по предложенному методу расчёта от результатов экспериментальных испытаний аналогичных плит на деформируемом основании составляет до 20%.

Апробация работы. Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались: на I международной научно-практической конференции «Автомобиль и техносфера» (Казань, 1999 г.); на международной конференции «Актуальные проблемы механики оболочек» (Казань, 2000 г.); на VIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Пермь, 2001г.); на международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» (Москва, 2002 г.).

В целом работа докладывалась на расширенном заседании кафедры «Сопротивления материалов и основ теории упругости и пластичности», КГАСУ (Казань, 2006г.) и совместном семинаре кафедры теоретической механики КГУ и лаборатории механики оболочек НИИММ им. Н.Г. Чеботарёва (Казань 2009г.)

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 16 работах.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов и списка использованных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена её цель и практическая значимость.

В первой главе приведён обзор литературы по теме диссертации и описание тех расчётных схем и методов, которые приняты в диссертационной работе, для решения поставленных задач.

Проблеме расчета конструкций, расположенных на деформируемом основании посвящено большое число научных исследований. Результаты расчета таких конструкций существенным образом зависят от соотношения между прогибами основания $w(x, y)$ и передаваемыми на него реактивными давлениями, то есть расчетные усилия в таких конструкциях при прочих равных условиях определяются принятой моделью основания.

В настоящее время предложено значительное число моделей, по-разному отражающих действительное поведение грунта под фундаментной конструкцией. Наиболее широко используются следующие схемы: модели с одним и двумя коэффициентами постели, модели упругого однородного изотропного полупространства и полуплоскости, различные комбинации этих моделей.

Теория расчета конструкций, лежащих на деформируемом основании с одним и двумя коэффициентами постели получила развитие в трудах А.Н. Динника, П.Л. Пастернака, М.Н. Герсегонова, Н.Е. Жуковского, А.Н. Крылова, А.А. Уманского, Г.Д. Дутова, В.А. Киселева, С.С. Голушкевича, Б.Г. Королёва, Н.К. Снитко, С.Н. Клёпикова, В.З. Власова, Н.Н. Леонтьева, М. Филоренко-Бородича, М.Н. Бородачева и многих других. Среди зарубежных ученых этой задачей занимались Вестергард, Ханси, Хэдсон и др.

Исследования, посвящённые расчету балок и плит, лежащих на основании, представляющем упругое изотропное полупространство были начаты В.Г. Герсегоновым. Также следует отметить работы, проведённые в этой области Г.Э.

Проктором, В.А. Флориным, Б.Н. Жемочкиным, И.Я. Штаерманом, А.П. Синицыным, Л.А. Галиным, О.Я. Шехтер и др.

Расчёту пластин и балок на нелинейном основании посвящены работы С.Н. Клёпикова, З.В. Бабичева, А.В. Вронского, В.Н. Караваева, А.А. Аендульева, В.Н. Шивалова, Е.Г. Соловьёва, Л.С. Ольховик и других авторов.

Обзор работ по данному вопросу показал, что модель коэффициента постели (Фусса-Винклера), полностью пренебрегающая осадками вне грузовой области и модель упругого слоя приводят к близким результатам в весьма широких пределах, то есть наличие быстро затухающих осадков вне грузовой площадки не вносит заметных возмущений в работу плиты, определённую без учета этих осадков.

Для расчёта упругих плит, расположенных на деформируемом основании разработаны и применены на практике различные эффективные методы, такие как метод компенсирующих нагрузок и его модификации, вариационные методы Риза, Бубнова-Галёркина, Власова-Кантроповича, метод конечных и граничных элементов, метод конечных разностей и др.

Упругопластическим расчетом пластин и балок стали активно заниматься последние 60 лет. Это работы Б.Г. Коренева, Р.В. Серебрякова, Ю.Т. Чернова, Е.А. Палатникова, В.И. Соломина, И.И. Шишова, В.Л. Высоковского, С.Б. Шматкова, Ю.Т.Чернова, А.С. Сытник, В.П. Гущина, В.Н. Караваева, М.П. Соловьёва, Г.В. Василькова, Р.Р. Бабаяна, В.Г. Минасяна, А.А. Мирумьяна, Г.А. Рапопорта и многих других.

Расчётами балок и плит и оболочек по теории предельного равновесия занимались многие исследователи. Для пластинок расчет по схеме с цилиндрическими шарнирами текучести впервые был дан А. Ингерслеем, позже метод получил развитие в трудах К. Иогансена, Е. Мансвилда, М. Нилсена, В. Ольшак, А. Савчук, А.М. Дубинского, А.С. Дехтярь, М.И. Ерхова, А.А. Ильюшина, В.В. Соколовского, Ю.Р. Лепик, Ю.Н. Работнова, В.И. Розенблюма, В.И. Себекиной, Ф.Г. Ходжа, В. Прагера, Ю.В. Немировского и др.

Построение расчёта конструкций на основе методов предельного равновесия стало особенно актуально после появления железобетона; поскольку недостатки использования теории упругого тела стали очевидны, прежде всего, для железобетонных конструкций.

Большое значение для развития методов расчета по стадии предельного равновесия имеют работы А.А. Гвоздева, который впервые строго доказал экстремальные принципы, дающие оценку снизу и сверху для несущей способности упругопластических систем. Многочисленные исследования фундаментных балок и плит на основе метода предельного равновесия проведены А.П. Синицыным. В большинстве работ по расчету пластинок используется кинематический метод, в котором задаются схемой разрушения.

Значительный вклад в развитие этого метода внёс А.Р. Ржаницын. В 1949 г. автор получил ряд результатов в этой области – найдены новые формы разрушения пластинок с криволинейными шарнирами текучести. В 1966 г. автор предложил для расчёта пластинок метод линейного программирования с регулярной сеткой возможных шарниров текучести, из которой получились линии шарниров текучести, близкие к действительности. Этот способ был применён в работах В.И. Терёхиной,

Г.Н. Бруснецова, А.Э. Боркаускаса. Большое внимание А.Р. Ржаницын уделил определению предельной нагрузки для железобетонных плит при различных нагрузках и способах опирания.

Глава 2 посвящена анализу предельного состояния круглой пластины. Рассмотрены предельные состояния круглой в плане пластины, лежащей на деформируемом основании Винклера (рис.1).

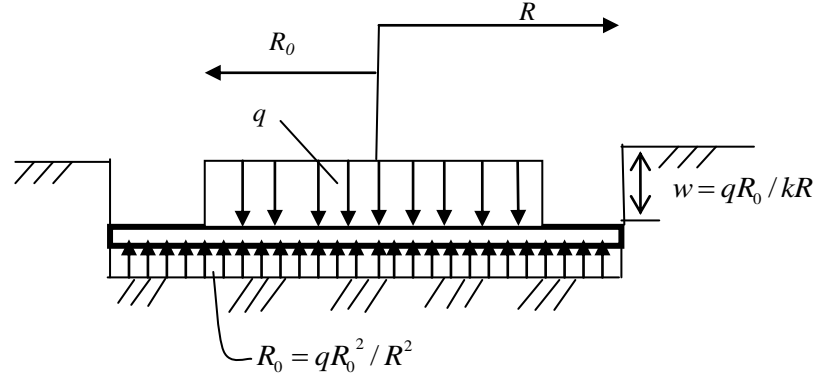


Рис.1

Плита считается армированной радиальной и кольцевой арматурой, граничные условия имеют вид:

$$w|_{L_w} = w_0,$$

здесь L_w - граница контура плиты

Согласно принципу возможных перемещений:

$$\int_V \sigma^{ik} \delta \varepsilon_{ik} dV = \int_S q_z \delta w dS + \int_S R_z \delta w dS, \quad (1)$$

где σ^{ik} - напряжения, удовлетворяющие уравнениям равновесия, если выполнено (1); δw - кинематически возможные малые приращения перемещений; $\delta \varepsilon_{ik}$ - кинематически возможные малые приращения деформаций; q_z - распределенная нагрузка; $R_z = -kw$ - распределенная реакция упругого основания; (k - коэффициент постели); R_0 - радиус круга, внутри которого приложена равномерно распределённая нагрузка.

Форму прогиба примем в виде:

$$w = w_0 \left(1 - \frac{r^n}{R^n}\right), \quad (n > 0). \quad (2)$$

а) Сначала рассмотрен случай свободного опирания плиты на грунт.

Пренебрегая работой постоянных сил типа собственного веса и учитывая выражение для функции прогиба (2), запишем выражение для приращения работы внешних сил в виде:

$$\delta T = \int_S q_z \delta w dS + \int_S R_z \delta w dS = \int_S 2\pi q \delta w_0 \left[\int_0^{R_0} \left(1 - \frac{r^n}{R^n}\right) r dr - \frac{R_0^2}{R^2} \int_0^R \left(1 - \frac{r^n}{R^n}\right) r dr \right]. \quad (3)$$

Здесь учтено, что (рис. 1): $2\pi q_z R_0^2 = -2\pi R_z R^2 \Rightarrow R_z = -q_z \frac{R_0^2}{R^2}$.

При учете функции прогиба (2) выражение (3) примет вид:

$$\delta T = 2\pi q_z \delta w_0 \left[\frac{n(R^2 - R_0^2)}{2(n+2)} \right]. \quad (4)$$

Выражение для приращения работы внутренних напряжений с учётом гипотезы Кирхгофа-Лява

$$\delta V = \iint_A [m_T^r |\delta \chi_r| + m_T^\theta |\delta \chi_\theta|] dA,$$

где χ_r и χ_θ - кривизны изогнутой поверхности пластины в направлении радиуса и окружном направлении; где m_T^r и m_T^θ - предельные изгибающие моменты в направлении радиуса и окружном направлении.

Учитывая функцию прогиба (2) получим:

$$\delta V = -2\pi h \sigma_T \delta w_0 [\alpha(n-1) + \beta], \quad (5)$$

здесь α , β учитывают процент армирования

Подстановка (4) и (5) в выражение принципа возможных перемещений (1), найдем значение q_z :

$$q_z = \frac{2\sigma_T h [\alpha(n-1) + \beta](n+2)}{n(R^2 - R_0^2)}. \quad (6)$$

Минимизируя (6) по параметру n находим $q_{nред}$ при $n=1$:

$$q_{nред} = \frac{6\sigma_T h \beta}{R^2 - R_0^2}.$$

б) Далее рассмотрим случай шарнирного опирания пластины. Выражение для работы внешних сил имеет вид:

$$\delta T = \iint_A q_z \delta w dA + \iint_A R_z \delta w dA = 2\pi \int_0^{R_0} q_z \delta w r dr - 2\pi \int_0^R k w \delta w r dr.$$

С учётом (2):

$$\delta T = 2\pi q_z \delta w_0 \left[\frac{R_0}{2} - \frac{R_0^{2n}}{R^n(n+2)} \right] - 2\pi k w_0 \delta w_0 \frac{R^2 n^2}{(n+2)(2n+2)}. \quad (7)$$

Используя выражение для работы внутренних сил (5), из соотношения (1) получаем выражение для распределенной нагрузки

$$q_z = \frac{\frac{k w_0 R^2 n^2}{(2n+2)(n+1)} - \sigma_T h [\alpha(n-1) + \beta]}{\frac{R_0^2}{2} - \frac{R_0^{2n}}{R^n(n+2)}}. \quad (8)$$

Минимизируя выражение (8) по параметру n можно получить значение предельной нагрузки, например при $R = R_0$. Минимального значения q_z достигает при $n=1$:

$$q_{nред} = \frac{k w_0}{2} + \frac{6\sigma_T h}{R^2} \alpha \quad (\alpha = \beta).$$

в) Далее эта задача решалась с привлечением уравнений равновесия. Условие текучести аппроксимировалось шестиугольником Сен-Венана (рис.2) а уравнение равновесия в моментах M_1 и M_2 записывалось в виде:

$$\frac{1}{\eta} \frac{d}{d\eta} \left(\frac{d}{d\eta} \eta M_1 - M_2 \right) = -q_*, \quad (9)$$

здесь $\eta = r / r_0$ - безразмерная радиальная координата, M_1, M_2 – изгибающие моменты;

$$q_* = \frac{r_0^2}{h^2 \sigma_T} (q - k w(\eta)) -$$

- поперечная нагрузка с учетом реакции основания.

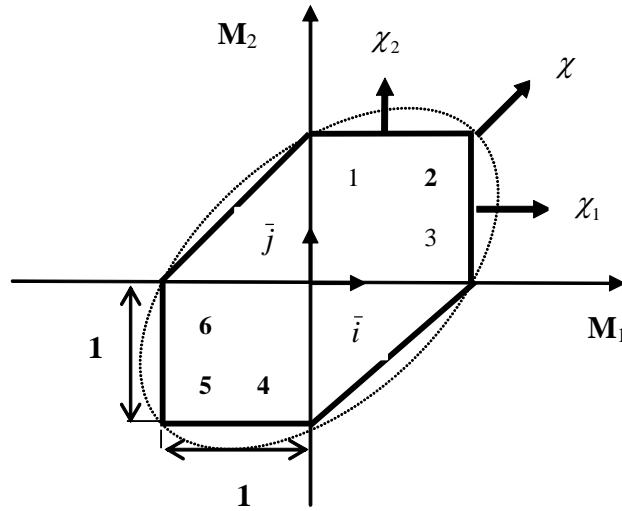


Рис.2. Шестиугольник Сен-Венана

Используя ассоциированный закон пластического течения

$$\varepsilon_i = \lambda \frac{\partial \Pi}{\partial \sigma_i}, \quad \lambda = \lambda(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3), \quad (i = 1, 2, 3),$$

где Π – потенциал текучести, для закона текучести в пластине получим:

$$\chi_1 = \lambda \frac{\partial \Pi}{\partial M_1}, \quad \chi_2 = \lambda \frac{\partial \Pi}{\partial M_2} \quad (10)$$

$$\Pi = \Pi(M_1, M_2) = M_1^2 + M_2^2 - M_1 M_2.$$

Теперь для χ_1 и χ_2 согласно (10) получим:

$$\chi_1 = \lambda(2M_1 - M_2), \quad \chi_2 = \lambda(2M_2 - M_1).$$

То есть вектор $\bar{\chi} = \chi_1 \bar{i} + \chi_2 \bar{j}$ ортогонален касательной к кривой $\Pi = M_T^2$. В силу этого на участке 1-2 имеем, $\chi_1 = 0$, $\chi_2 \neq 0$, и $M_2 = M_T = const$, а на участке 2-3 имеем $\chi_2 = 0$, $\chi_1 \neq 0$ и $M_1 = M_T$.

Исследовав всевозможные состояния изгибания, получается, что условие $M_1 > M_2$ противоречит условию разрушения изгибанием и должно быть $M_1 \leq M_2 = M_T = const$ в предельном состоянии с изгибанием. Тогда из уравнения равновесия следует (так как $M_T = const$):

$$M_1 = -\frac{1}{\eta} \int_0^{\eta} \left\{ \int_0^{\eta} q_* \eta d\eta \right\} d\eta + C_1 + \frac{C_2}{\eta}.$$

При шарнирном опирании кромки ($\eta = 1$) имеем $M_1 = 0$, то есть

$$\int_0^1 \left\{ \int_0^1 q_*(\eta) \eta d\eta \right\} d\eta = M_T. \quad (11)$$

Форма изгибания дается равенством:

$$w = \alpha(1 - \eta), \quad (12)$$

где учтено то, что $w(1) = 0$. Подстановка функции (12) в равенство (11) дает:

$$q_z = 6 \frac{h^2 \sigma_T}{r_0^2} + \frac{1}{2} k \alpha$$

Таким образом:

$$q_{пред}^{стат} = \frac{6h^2 \sigma_T}{r_0^2} + \frac{k\alpha}{2} = q_{пред}^{кинем} \quad (n=1),$$

$$(\alpha = \beta = h).$$

В третьей главе разработана методика расчёта несущей способности плиты, лежащей на деформируемом основании, при действии на неё параметрической нагрузки (рис.3), которую представим в виде:

$$\bar{p}(x, y) = t p_0(x, y),$$

где t - параметр нагружения, $p_0(x, y)$ - функция распределения нормированной нагрузки, тогда

$$R = tR_0, \quad M_x = tM_{x0}, \quad M_y = tM_{y0}$$

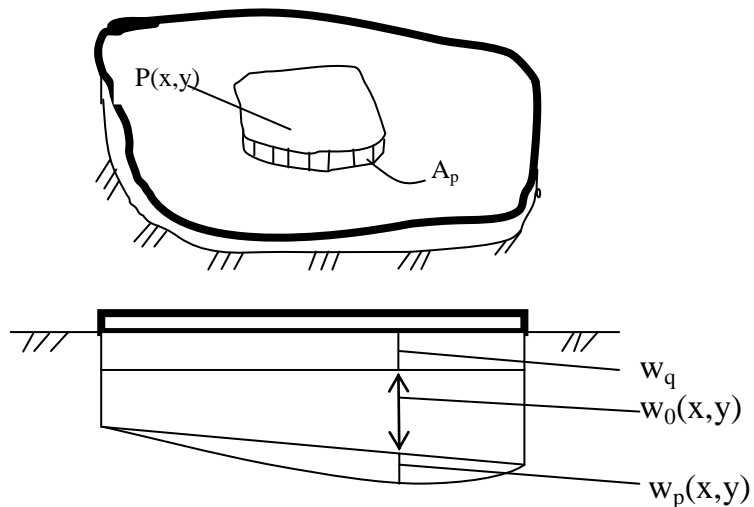


Рис.3

Для оценки несущей способности плиты (определение предельной нагрузки P) используем кинематический принцип теории предельного состояния. При этом для плиты принимается модель жесткопластического тела, а для основания - модель Винклера.

Таким образом, реакция основания будет определяться выражением

$$r(x, y) = -kw(x, y),$$

где k - коэффициент постели; $w(x, y)$ - вектор перемещения срединной поверхности плиты, которое состоит из осадки плиты под действием собственного веса, осадки как абсолютно жесткого тела и перемещений, связанных с появлением пластических деформаций плиты в предельном состоянии:

$$w = w_q + w_0 + w_p, \quad (13)$$

где w_q - осадка плиты под действием собственного веса или от другой равномерно распределенной не параметрической нагрузки. Ее величина определяется выражением

$$w_q = -q_k / k -$$

величина осадки является постоянной величиной, как по площади плиты, так и по отношению к параметру нагружения.

w_0 - осадка плиты как абсолютно жесткого тела (до наступления предельного состояния), определяется выражением:

$$w_0 = a_0 + b_0x + b_0y - \quad (14)$$

w_p - перемещения срединной поверхности плиты с наступлением режима пластического течения. Они определяются в теории предельного состояния с точностью до неопределенного множителя, поэтому их будем считать величиной малого порядка по отношению к w_0 и пренебрегать ими в (13) при определении реакции основания.

Коэффициенты функции прогибов w_0 из уравнения (14) находятся из уравнений статики для плиты, составленных в произвольной системе координат для параметрических нагрузок и соответствующей реакции основания:

$$\begin{aligned} \sum z = 0, \quad & -k \iint_A (a_0 + b_0x + c_0y) dA + \iint_{A_p} p(x, y) dA = 0 \\ \sum mom_x = 0, \quad & -k \iint_S (a_0 + b_0x + c_0y) y dA + \iint_{A_p} p(x, y) y dA = 0 \\ \sum mom_y = 0, \quad & -k \iint_A (a_0 + b_0x + c_0y) x dA + \iint_{A_p} p(x, y) x dA = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

В уравнениях (15) интегрирование производится по площади срединной поверхности A и поверхности приложения нагрузки A_p . Система является линейной и приводится к виду:

$$\begin{aligned}
Aa_0 + S_y b_0 + S_x c_0 &= R/k \\
S_x a_0 + J_{xy} b_0 + J_x c_0 &= M_x/k \\
S_y a_0 + J_y b_0 + J_{xy} c_0 &= M_y/k,
\end{aligned} \tag{16}$$

где A - площадь поверхности плиты; $S_x = \iint_A y dA$, $S_y = \iint_A x dA$ - статические моменты площади, занимаемой поверхностью плиты; $J_x = \iint_A y^2 dA$, $J_y = \iint_A x^2 dA$, $J_{xy} = \iint_A xy dA$ - моменты инерции; R - равнодействующая внешней параметрической нагрузки $p(x, y)$; M_x, M_y - моменты относительно осей x и y от внешней параметрической нагрузки $p(x, y)$.

В общем случае для определения коэффициентов a_0, b_0, c_0 необходимо решить систему (16).

На основе принципа возможных перемещений:

$$W = V,$$

где V - работа внутренних сил, W - работа внешних параметрических сил на кинематически возможных перемещениях и состоит из работы параметрической нагрузки и реакции основания.

$$\begin{aligned}
A &= \iint_{A_p} p w_p dA + \iint_A r w_p dA = \iint_{A_p} p w_p dA + \iint_A k w_0 w_p dA = \\
&= t \iint_{A_p} p_0 w_p dA + k \iint_A (a_0 + b_0 x + c_0 y) w_p dA = \\
&= t \left[\iint_{A_p} p_0 w_p dA + \iint_A r_0 (S, S_x, S_y, J_x, J_y, J_{xy}, R_0, M_{x0}, M_{y0}) w_p dA \right]. \tag{17}
\end{aligned}$$

В уравнение (17) не входит работа, совершаемая непараметрическими равномерно распределенными нагрузками (собственный вес плиты и т.д.), так как она компенсируется работой, совершаемой реакцией основания.

Работу внутренних сил V можно представить в виде:

$$V = \iint_A M_i \theta_i dA + \sum_{j=1}^m \int_{l_j} M_i \Delta \theta_i dl, \quad (i = \bar{1}, \bar{n}), \tag{18}$$

где θ_i - обобщенные деформации, M_i - ассоциированные с ними из условия текучести обобщенные напряжения. Второе слагаемое в (18) представляет работу внутренних сил на разрывах обобщенных деформаций.

Таким образом, задачу определения несущей способности плит сводится к задаче минимизации функционала

$$t = \iint_A M_i \theta_i dA + \int_{l_j} M_i \Delta \theta_i dl,$$

при соблюдении условий нормирования перемещений:

$$\iint_{A_p} p_0 w_p dA + \iint_A r_0 w_p dA = 1,$$

и условия текучести:

$$f(M_i) = 1.$$

В четвёртой главе разработан алгоритм и на его основе создана компьютерная программа. Рассмотрен ряд примеров о расчёте прямоугольных железобетонных плит с защемлённым и свободным контуром, при действии сосредоточенной силы, приложенной в любой её точке.

а) Для случая шарнирного опирания принимались схемы разрушения, приведённые в таблице 2. Они получены путём упрощения известных схем, использованных А.Р. Ржаницыным в работе «Расчет пластинок по предельному состоянию на действие сосредоточенной силы» //Исследования по теории сооружений. М: Стройиздат, вып. IV. -1949. – С.79-95.

Были рассмотрены плиты со следующими соотношениями сторон: $\lambda = a/b = 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.5, 2.75, 3.0$. Расчёты велись с разбивкой 5*5. В каждой точке плиты получено три значения предельной нагрузки - $P^1_{np}, P^2_{np}, P^3_{np}$, соответствующие трём схемам разрушения (табл. 2), наименьшее из которых согласно основному принципу кинематического метода определения предельной нагрузки, считаем наиболее близким к истинному значению. Таким образом, из всех обследованных схем разрушения выбирается та, которая даёт наименьшее значение разрушающей нагрузки. Плита делится на зоны, окончательное расположение зон разрушения прямоугольных пластинок показано на рис.4 а. При соотношении сторон $\lambda > 2.25$ схема разрушения для центральной части плиты заменяется схемой 4. Значения предельных нагрузок для некоторых плит приведены в виде графиков и поверхностей (рис. 5).

б) Для плиты со свободным контуром предполагается использовать схемы разрушения, показанные в таблице 1. Здесь же приводятся и соответствующие им расчётные формулы для определения мощности внутренних сил в шарнирах текучести. Рассчитаны плиты с соотношениями сторон $\lambda = a/b = 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.5, 3.0$. Расположение зон разрушения для плит со свободным контуром показано на рис. 4 б. Значения предельных нагрузок представлены на графиках и поверхностях (рис. 6).

в) В более сложных случаях многослойных пластин при численном методе отыскания предельной нагрузки можно использовать критерии прочности для тонких пластин в обобщенных напряжениях, полученными И.Г. Терегуловым и Э.С. Сибгатуллиным в работе « Критерии разрушения для многослойных пластин и оболочек». //Механика композитных материалов. - 1990. - № 1. – С.74-79.

С использованием вышеизложенной методики и созданной на ее основе компьютерной программы получены условия прочности для нескольких вариантов конструкций жестких дорожных одежд с целью выявления влияния различных конструктивных факторов на прочность дорожной одежды. За прочностные

характеристики слоев приняты расчетные сопротивления материалов сжатию, растяжению и сдвигу. Для конструкций с арматурной сеткой вводятся усредненные характеристики армированного слоя.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчёта несущей способности плиты, лежащей на деформируемом основании при действии на неё параметрической нагрузки. При этом для плиты принята модель жёсткопластического тела, а для основания - модель Фусса-Винклера.

2. Разработанная методика численно реализована для прямоугольных железобетонных плит, лежащих на деформируемом основании при действии сосредоточенной силы. Рассмотрены случаи шарнирно опёртых по периметру плит и пластин со свободным контуром. В качестве предельного состояния для любого сечения плиты принято возникновение цилиндрических шарниров текучести, при которых образуется двугранный угол любой величины при постоянном предельном значении изгибающего момента в этом сечении. Рассмотрены формы разрушения с прямолинейными шарнирами текучести, зона разрушения представляет собой конус.

3. Получено аналитическое решение задачи об определении предельной нагрузки для круглой в плане железобетонной пластины, лежащей на упругом основании. Условие текучести для плиты аппроксимировалось шестиугольником Сен-Венана, а перемещения - степенной функцией.

4. Численные результаты получены для прямоугольных плит с различными соотношениями сторон. Получены схемы разрушения плиты, в зависимости от точки приложения силы, которым соответствуют наименьшие значения предельных нагрузок.

5. Для плит со свободным опиранием получены условия, определяющие зоны приложения силы, при которых происходит «отлипание» краёв плиты от основания.

6. Для конструктивно сложных плит (анизотропных, многослойных) использовано интегральное условие прочности, на основе которого создана компьютерная программа. В качестве примера получены условия прочности для нескольких вариантов жестких дорожных одежд и разработан алгоритм расчёта предельной нагрузки для них. Приведены примеры расчёта.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Публикации в рекомендованных ВАК изданиях:

1. Терегулов И.Г., Предельное состояние плит, лежащих на деформируемом основании / И.Г. Терегулов, Э.Р. Терегулова, В.Г. Низамеев, Р.А. Каюмов // Известия ТулГУ. Естественные науки. Вып. 2 – Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. – С. 108-111.

2. Терегулова Э.Р. Метод оценки несущей способности железобетонных плит, лежащих на деформируемом основании / Э.Р. Терегулова, В.Г. Низамеев // Известия КазГАСУ – Казань: Изд-во Каз ГАСУ, 2009. - № 2(12). –С. 135-141.

Публикации в других изданиях:

3. Терегулова Э.Р. Предельное состояние (несущая способность) плит на

деформируемом основании / Э.Р. Терегулова / Материалы 52-й республиканской научной конференции: Сборник научных трудов аспирантов. – Казань. – КГАСА, 2000. – С. 103-107.

4. Низамеев В.Г. Влияние различных конструктивных факторов на прочность жестких дорожных одежд / В.Г. Низамеев, Э.Р. Терегулова // Автомобиль и техносфера: Труды I Международной научно-практической конференции. Казань: КГТУ им. Туполева, изд. «Мастер Лайн». 1999. – С.415-417.

5. Брехман А.И. К расчету на прочность плиты, лежащей на упругом основании / А.И. Брехман, Э.Р. Терегулова, В.Г. Низамеев / Автотранспортный комплекс. Проблемы и перспективы развития: Тезисы докладов. М: ОНТИ МГАДИ (ТУ), 2000. – С. 160-163.

6. Терегулова Э.Р. Несущая способность пластины, лежащей на деформируемом основании / Э.Р. Терегулова / VIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: Аннотации докладов. Пермь: НИСО УрО РАН № 77(01), 2001. – С. 454.

7. Терегулов И.Г. Несущая способность плит, лежащих на деформируемом основании / И.Г. Терегулов, Э.Р. Терегулова / Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы VIII Международного симпозиума. Москва: «Оптимпресс», 2002. – С. 87.

8. Терегулова Э.Р. Оценка несущей способности железобетонной плиты, лежащей на деформируемом основании / Э.Р. Терегулова // VIII Четаевская международная конференция. Аналитическая механика, устойчивость и управление движением: Тезисы докладов / Казань: Изд-во Казанского гос. техн. ун-та, 2002. – С. 335.

9. Терегулова Э.Р. Несущая способность железобетонной плиты, лежащей на деформируемом основании / Э.Р. Терегулова / Республиканский конкурс научных работ среди студентов и аспирантов на соискание премии им. Н.И. Лобачевского: Сборник тезисов итоговой конфер. Том II. Казань: КГУ, 2002. – С. 130-131.

10. Терегулова Э.Р. Метод оценки несущей способности пластины, разработанный на основе кинематического принципа теории предельного состояния / Э.Р., Терегулова / IV Научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов РТ: Тезисы докладов. Казань: Изд-во «Мастер Лайн», 2002. – С. 174.

11. Алексеев К.П. Теоретико-Экспериментальное исследование необратимых процессов деформирования волокнистых композитов. Исследование необратимых процессов деформирования намоточных материалов с учётом накопления микроповреждений / К.П. Алексеев, Р.Ш. Ахметзянова, Р.Н. Закиров, В.Г. Низамеев, Э.Р. Терегулова // Аннотированные отчёты фонда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ республики Татарстан. Казань: физтехпресс, 2002. – С. 250-251.

12. Терегулова Э.Р. Расчет предельной нагрузки для прямоугольной железобетонной плиты, лежащей на деформируемом основании /Э.Р. Терегулова, В.Г. Низамеев / Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий: Сборник материалов XV Всероссийской межвузовской научно-технической конф. Часть.1. Казань: Михайловский военный

артиллерийский университет. 2003.- С. 388.

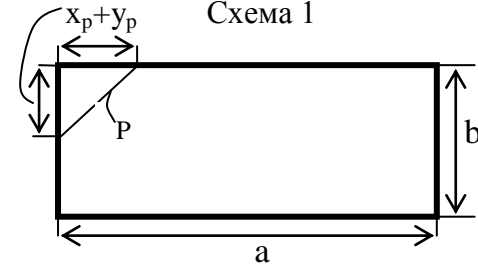
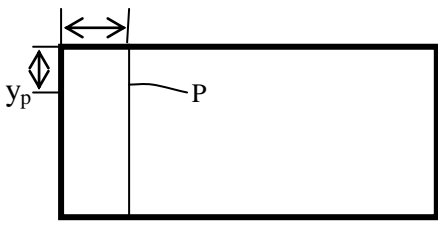
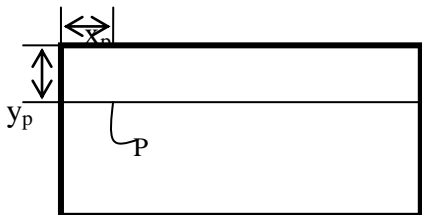
13. Алексеев К.П., Теоретико-Экспериментальное исследование длительной прочности намоточных композиционных материалов. Этап 2002 г. Исследование ползучести намоточных композиционных материалов на трубчатых образцах К.П. Алексеев, Д.Х. Сафиуллин, Р.Н. Закиров, И.З. Мухамедова, Э.Р. Терегулова, Л.В. Иванова, Е.П. Нурутдинова // Отчёты конкурса проектов академии наук РТ фундаментальные и прикладные науки. Казань: изд. «Фэн», 2004. - С. 105-106.

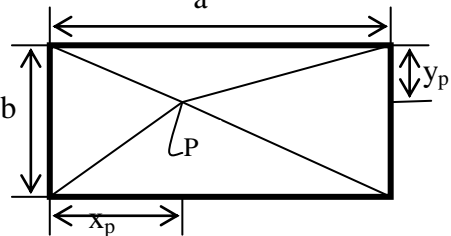
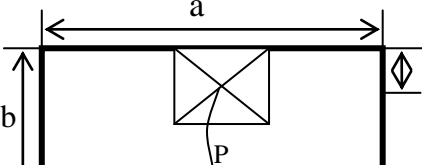
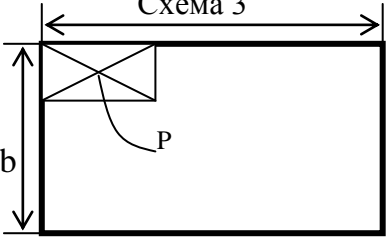
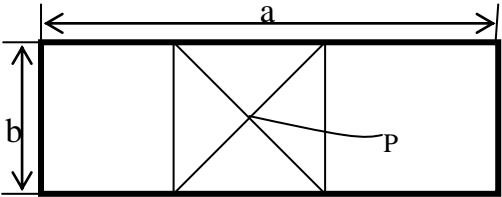
14. Терегулова Э.Р. К расчету прочности жестких дорожных одежд / Э.Р. Терегулова, В.Г. Низамеев // Дороги и транспорт республики Татарстан.. – 2005. – № 12. – С.40-41.

15. Брехман А.И. К определению несущей способности жестких дорожных одежд / А.И. Брехман, И.Г. Терегулов, В.Г. Низамеев, Э.Р. Терегулова // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2007. - № 2. – С. 22-24.

16. Терегулова Э.Р. Оценка несущей способности плит на деформируемом основании / Э.Р. Терегулова, В.Г. Низамеев / Тезисы докладов 61-ой Республиканской научной конференции Каз ГАСУ. – Казань: Изд-во КазГАСУ, 2009. – С. 249.

Таблица 1

Схема разрушения	Формула для вычисления мощности предельных моментов в шарнирах текучести
<p>Схема 1</p> 	$V = m_T (x_p + y_p) \left[\frac{1}{x_p} + \frac{1}{b - y_p} \right] \text{ при } y_p > x_p$ $V = m_T (x_p + y_p) \left[\frac{1}{y_p} + \frac{1}{b - x_p} \right] \text{ при } x_p > y_p$
<p>Схема 2</p> 	$V = m_T \frac{ba}{x_p (a - x_p)}$
<p>Схема 3</p> 	$V = m_T \frac{ab}{y_p (b - y_p)}$

<p>Схема разрушения</p>	<p>Расчётная формула для вычисления мощностей предельных моментов в шарнирах текучести</p>
<p>Схема 1</p>  <p>Нагрузка приложена в центральной части плиты</p>	$V = m_T \left(\frac{a_1 + a_2}{b_1} + \frac{b_1 + b_2}{a_2} + \frac{a_1 + a_2}{b_2} + \frac{b_1 + b_2}{a_1} \right)$ $a_1 = x_p, \quad a_2 = a - x_p$ $b_1 = y_p, \quad b_2 = b - y_p$
<p>Схема 2</p>  <p>Нагрузка приложена волизи края плиты</p>	$V = m_T \left(\frac{a_1 + a_2}{b_2} + \frac{b_1 + b_2}{a_1} \right) + 6m_T$ <p>при $y_p < x_p$ $a_1 = a_2 = b_1 = b_2 = y_p$ при $x_p < y_p$ $a_1 = a_2 = b_1 = b_2 = x_p$</p>
<p>Схема 3</p>  <p>Нагрузка приложена вблизи вершины угла</p>	$V = m_T \left(2 \frac{a_1 + a_2}{b_2} + 2 \frac{b_1 + b_2}{a_1} + \frac{a_1 + a_2}{b_1} + \frac{b_1 + b_2}{a_2} \right)$ $a_1 = a_2 = x_p$ $b_1 = b_2 = y_p$
<p>Схема 4</p>  <p>при $a/b > 2.25$ Нагрузка приложена в центральной части плиты</p>	$V = m_T \left(\frac{a_1 + a_2}{b_1} + \frac{a_1 + a_2}{b_2} \right) + 4m_T$ $b_1 = y_p, \quad b_2 = b - y_p$ <p>при $b_1 < b_2$ $a_1 = a_2 = b_1$ при $b_2 < b_1$ $a_1 = a_2 = b_2$</p>

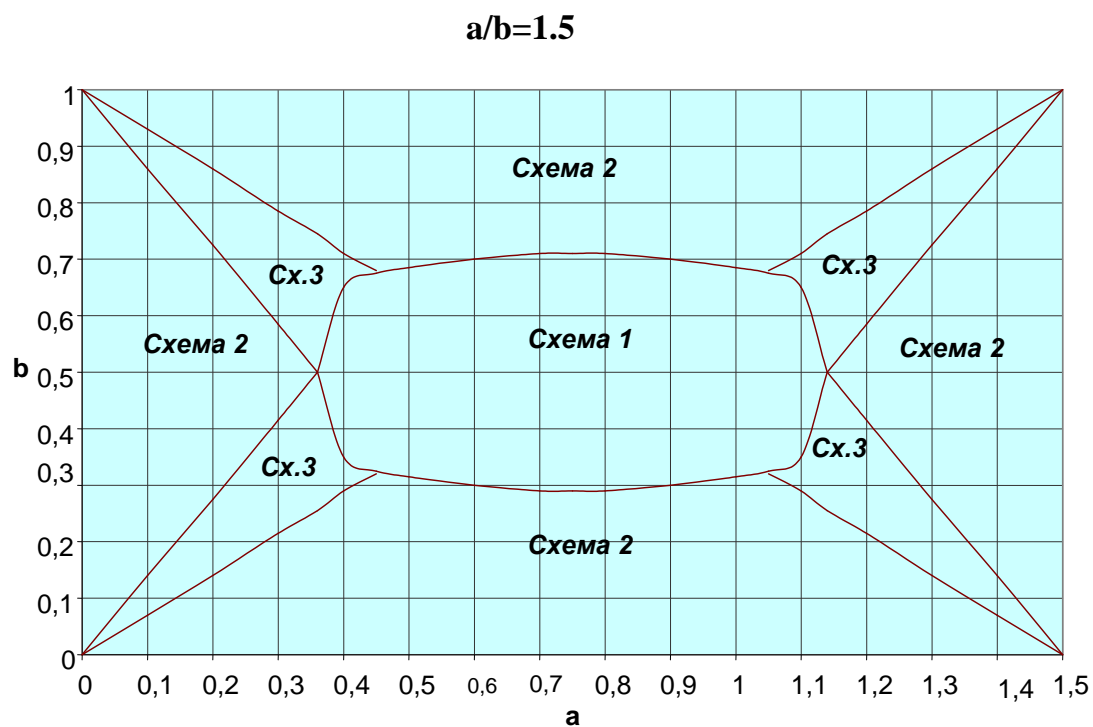


Рис.4 а) Зоны действия расчётных схем для плит с шарнирным опиранием сторон

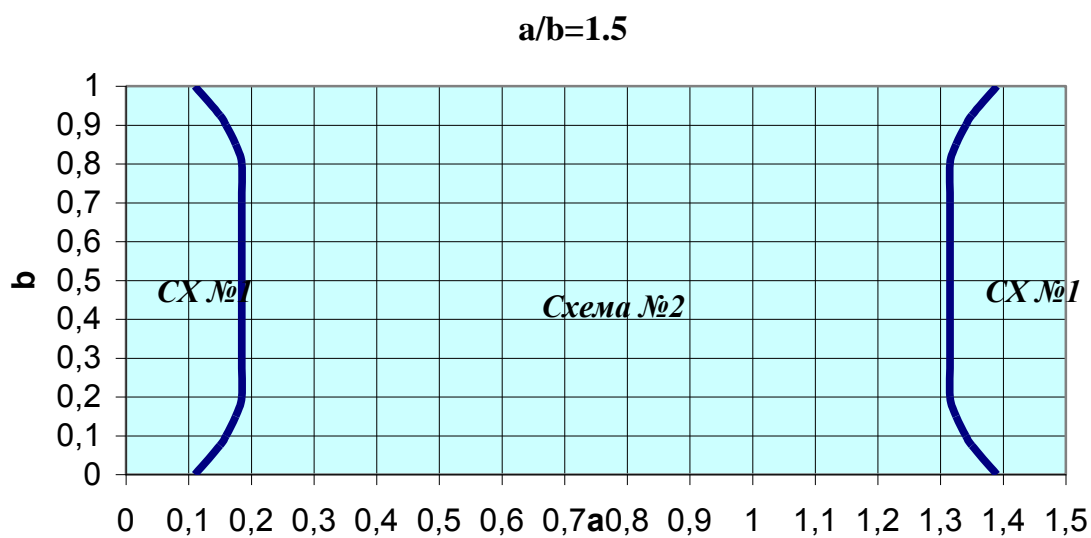


Рис. 4.б) Зоны действия расчетных схем для плит со свободным контуром

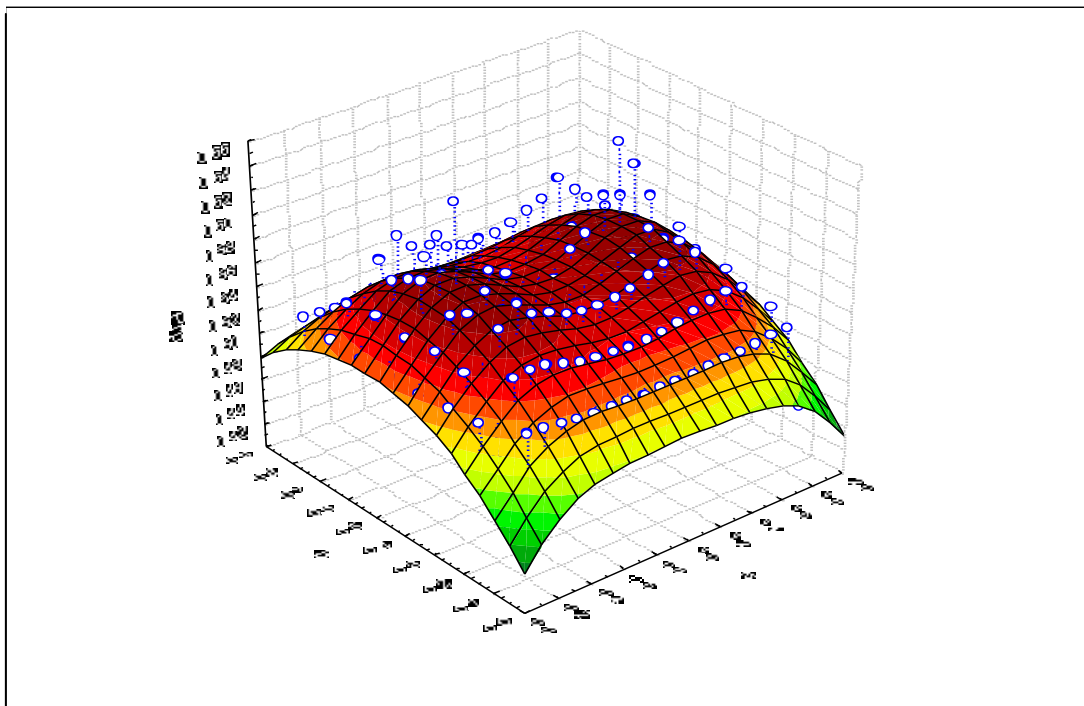
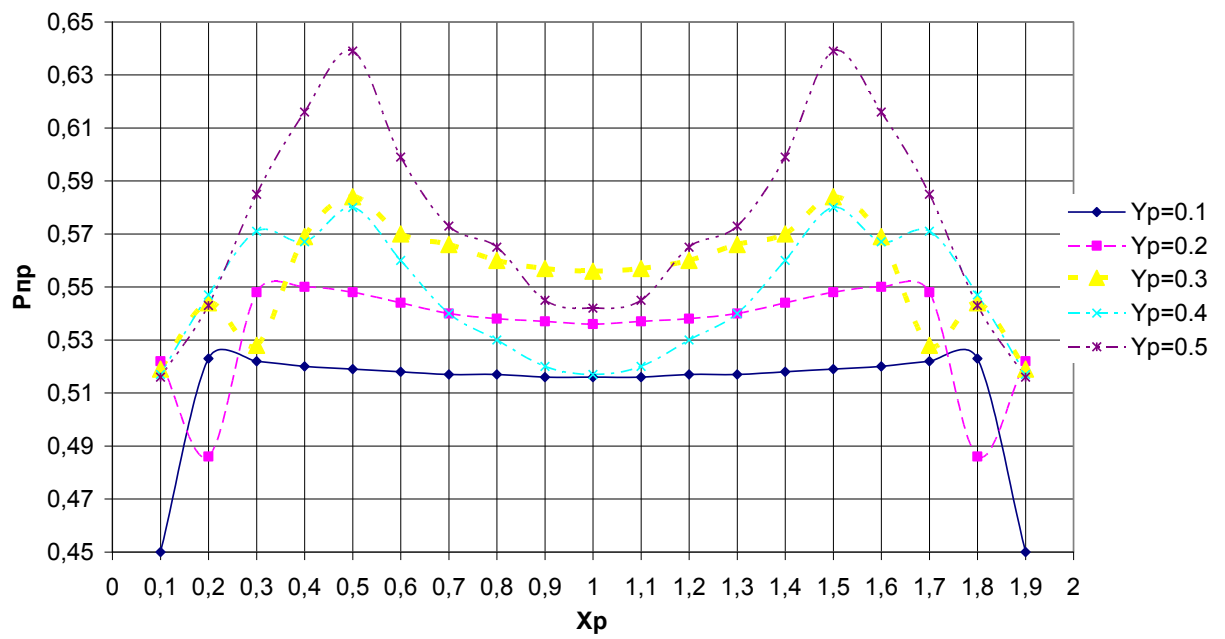


Рис. 5. Значения предельной нагрузки для плиты с шарнирным опиранием ($a/b=2$)

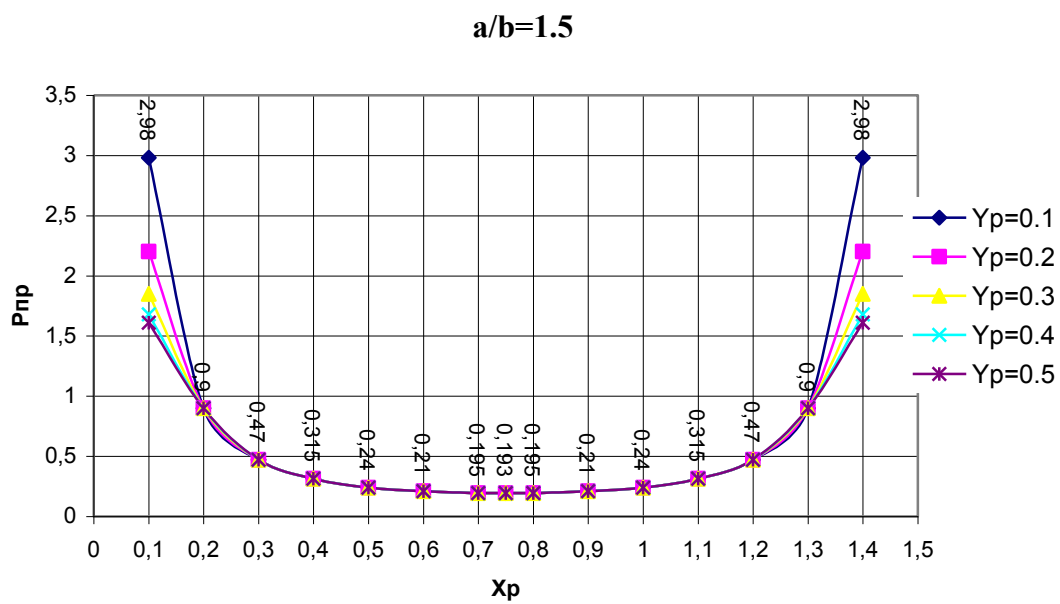


Рис.

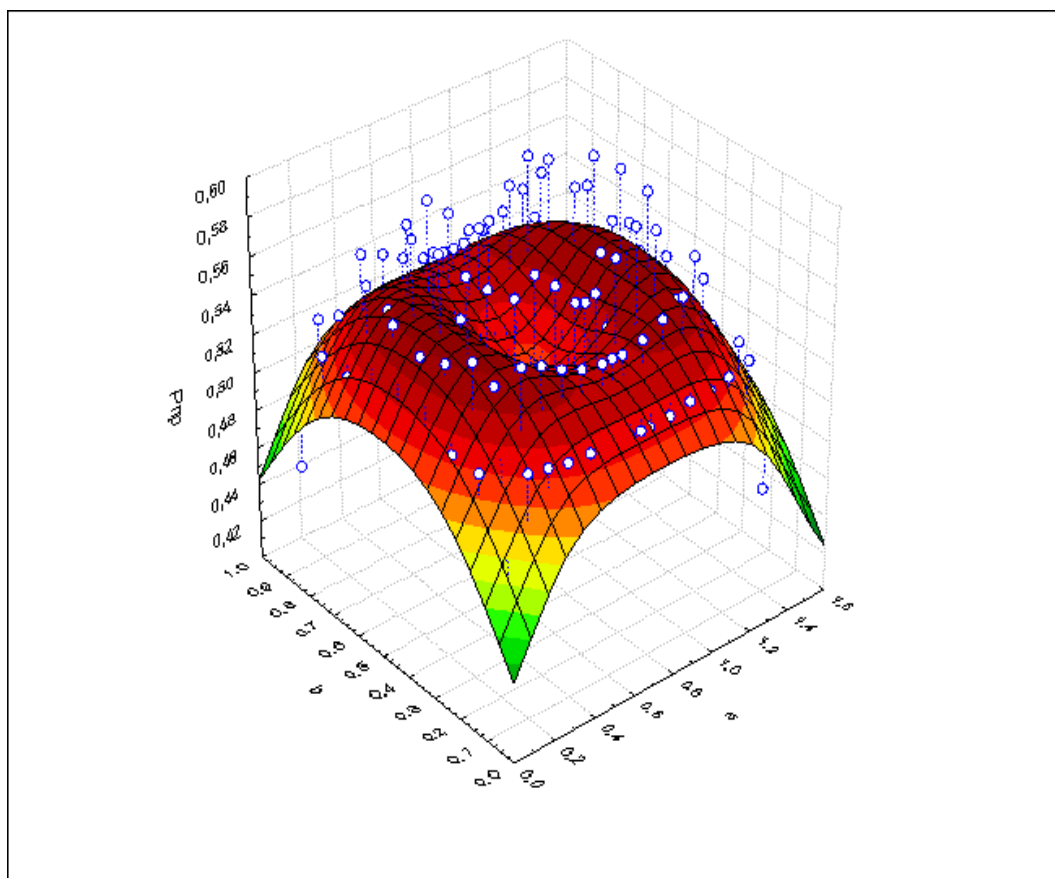


Рис. 6. Значения предельной нагрузки для плит со свободным контуром